

## Artículo de investigación

**ESTUFAS MEJORADAS Y BANCOS DE LEÑA: UNA ALTERNATIVA DE AUTOABASTECIMIENTO ENERGÉTICO A NIVEL DE FINCA PARA COMUNIDADES DEPENDIENTES DE LOS BOSQUES DE ROBLE DE LA CORDILLERA ORIENTAL<sup>1</sup>***Improved cook stoves and fuelwood lots: an alternative of fuel self-supply for small farmers dependent of oak forests in the Colombia eastern cordillera*

**Palabras clave:** bancos dendroenergéticos, cámara de combustión, consumo de leña, eficiencia energética, estufas mejoradas.

**Key words:** fuelwood lots, combustion chamber, fuelwood consumption, energy efficiency, improved cookstoves.

*Javier Darío Aristizábal Hernández<sup>2</sup>*

**RESUMEN**

Para mejorar la eficiencia térmica de las estufas tradicionales utilizadas en el área rural del municipio de Encino, Santander se construyeron tres prototipos de estufas mejoradas, mediante una modificación efectuada a la cámara de combustión. Las estufas fueron ensayadas aplicando la Prueba de Cocimiento Controlado (PCC) y fueron comparadas contra una estufa testigo (tradicional). Los resultados arrojaron un rendimiento promedio del 14.66% entre las estufas mejoradas y la tradicional, lo cual implica un ahorro en el consumo de leña de 0.86 ton/año. De igual forma, se propone el diseño de bancos de leña domésticos evaluando cuatro especies forestales utilizadas para propósitos energéticos en la región. Finalmente, se analiza el impacto en términos de emisiones evitadas de CO<sub>2</sub> bajo un enfoque que integre tanto estufas mejoradas de leña como bancos dendroenergéticos.

**ABSTRACT**

In order to improve thermal efficiency of typical cookstoves used in rural area of Encino, Santander, three improved cookstoves prototypes were built, by means of a modification carried out at combustion chamber. The improved cookstoves were

tested by using Controlled Cooking Test (CCT) and compared against a typical cookstove. Scores displayed a mean performance of 14.66% among improved cookstoves and typical cookstove, which implies a saving in fuelwood consume of 0.86 ton/year. Likewise, farm fuelwood lots design is proposed by comparing four tree species used for cooking purposes in that place. Finally, impact in terms of avoided deforestation and carbon dioxide emissions is assessed, under a focus that it could integrate both improved cookstoves and farm fuelwood lots.

**INTRODUCCIÓN**

La Agencia Internacional de Energía (2006), estima que cerca de 2500 millones de personas dependen de la leña como su principal combustible para calefacción y cocción de alimentos y se espera que para el año 2030 dicha cifra ascienda a 2700 millones. Lo anterior deja clara la importancia que seguirá teniendo la leña como combustible en los próximos veinte años. De acuerdo al Sistema de Información Ambiental de Colombia (2006), el consumo de leña para el año 2005 en Colombia, alcanzó los 8.46 millones m<sup>3</sup>, lo que representaba el 83 % del total de la madera extraída en el país en ese año.

<sup>1</sup> Resultados del proyecto de investigación “Producción sostenible y manejo eficiente de la leña como estrategia de reducción de la deforestación en ecosistemas asociados al roble”, desarrollada en el marco del proyecto “Corredor de conservación de robles, una estrategia para la conservación y el manejo forestal en Colombia”, ejecutado por la Fundación Natura con el apoyo de la Fundación MacArthur.

<sup>2</sup> Fundación Natura, [jaristizabal@natura.org.co](mailto:jaristizabal@natura.org.co)

Debido a que la leña suele ser el eslabón más débil dentro de la matriz energética de muchos países, no se cuenta con datos confiables sobre consumo y por ende, todo se reduce a estimaciones. Según la Organización Mundial de la Salud (2006), el 15% de la población colombiana depende de combustibles sólidos (leña y carbón vegetal) para solventar sus necesidades de calefacción y cocción de alimentos. Un estudio efectuado por Ocaña (2005) en el área rural del municipio de Encino (Santander), demostró que el 79% de las familias evaluadas utilizaban exclusivamente leña como combustible de cocción y en promedio una familia consumía anualmente 6.2 toneladas, lo cual representa un consumo per capita de 2.9 kg/día.

Debido a que el sector rural de subsistencia se caracteriza por su bajo poder adquisitivo, es muy difícil que se presente una evolución hacia el uso de recursos energéticos modernos. De hecho, la falta de suficientes ingresos económicos sumado a la circunstancia que la leña se encuentra disponible libremente, conlleva a que la gente continúe dependiendo de este recurso para sus necesidades de cocción (Barnes *et al.* 1994). Bajo este criterio, la adopción de tecnologías más eficientes se convierte en un importante paliativo de cara a disminuir el consumo de leña y reducir la dependencia existente de los bosques adyacentes que sirven como fuente de recolección.

La introducción de una nueva tecnología supone mejores rendimientos en términos de consumo en comparación con una estufa tradicional ó un fogón abierto. Una estufa mejorada es aquella tecnología de cocción cuyo diseño hace posible que la eficiencia general sea comparativamente superior a la estufa tradicional. En este sentido, la eficiencia general de la estufa es el producto entre la eficiencia del proceso de combustión de la leña y la eficiencia de la transferencia térmica. Sin bien en un fuego abierto, la eficiencia del proceso de combustión puede ser superior al 90%, solo una pequeña proporción de la energía liberada se transmite a la superficie de cocción, haciendo que su eficiencia general sea muy baja, lo cual repercute en un mayor consumo de leña (Aprovecho Research Center

2005). Por esta razón, confinar el fuego en un espacio cerrado es una estrategia fundamental para mejorar la eficiencia general. No obstante, el simple hecho de encerrar el fuego no garantiza que se produzca un mejoramiento de la transferencia térmica, puesto que un mal diseño de la estufa puede implicar incluso mayores consumos de leña que un fuego abierto (Aprovecho Research Center 2005).

La presente investigación pretende demostrar como un enfoque integrado de adopción de nuevas tecnologías de cocción y bancos dendroenergéticos pueden reducir el consumo de leña procedente de bosque naturales, y en este caso en particular, de los robledales que hacen parte del Corredor de Conservación Guantiva – La Rusia – Iguaque.

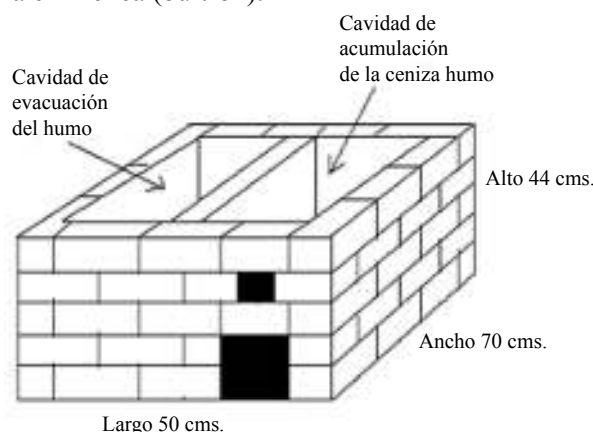
## MATERIALES Y MÉTODOS

### ***PRINCIPIOS DE DISEÑO Y CRITERIOS DE CONSTRUCCIÓN***

Desde la década de los años ochenta, los diseños de estufas mejoradas apuntaban a reducir las pérdidas de calor y optimizar la transferencia térmica del fuego hacia las ollas. Con el tiempo, el análisis ingenieril sobre los procesos termodinámicos que suceden al interior de una estufa de leña, han permitido establecer una serie de fundamentos técnicos que han servido de marco de referencia para la construcción de diferentes modelos alrededor del mundo. En este sentido, la nueva estufa contemplaba una modificación en la cámara de combustión, basada en los siguientes diez principios: aislar el fuego, usando materiales livianos y resistentes al calor; construir un ducto por encima del lecho de ignición; calentar y quemar las puntas de los leños a medida que ingresen al fuego; la gradación del calor es proporcional a la cantidad de leña que es ingresada al fuego; mantener una buena corriente de aire hacia el fuego; una corriente de aire muy pequeña producirá humo y una excesiva cantidad de tizones; el área de la sección transversal debe ser constante en la cámara de combustión; el lecho de ignición debe descansar sobre una parrilla; aislar la ruta por la que fluye el calor; maximizar la transferencia de calor hacia la superficie de cocción mediante apropiados espacios de separación.

Las especificaciones técnicas de la estufa comprenden un modulo base de 90 centímetros de largo por 70 centímetros de ancho, sin embargo estas dimensiones pueden variar dependiendo de los requerimientos y necesidades de los usuarios. La altura promedio de la estufa es de 85 centímetros.

La base de la estufa se construyó hasta una altura aproximada de 44 centímetros con respecto al piso y fue dividida por un muro para conformar las cavidades de evacuación de humo (a la izquierda del muro) y de acumulación de ceniza (a la derecha del muro). En la parte frontal de la cavidad de acumulación de ceniza, se dejaron dos espacios: uno a nivel del suelo que tiene como propósito la acumulación de la ceniza y el otro por debajo de la ultima hilada de ladrillos de la base de la estufa que tiene como objeto permitir el flujo de la corriente de aire para avivar las llamas. En la cavidad de evacuación del humo se hizo un orificio para que conecte con la chimenea (buitrón).



**Figura 1.** Base del nuevo prototipo de estufa.

La cámara de combustión fue construida con ladrillo refractario con el propósito de evitar las pérdidas de calor por conducción y maximizar la transferencia calórica hacia las planchas. De acuerdo a los principios de diseño (Aprovecho Research Center 2005), un punto clave en la construcción de la cámara de combustión tiene que ver con la sección transversal de la misma, la cual, debe mantenerse constante tanto en la boca de entrada como en la de salida y por ende, a lo largo de la cámara de combustión. En virtud de lo anterior, se estimó

conveniente diseñar la cámara de combustión con una sección transversal de  $280 \text{ cm}^2$ , considerando que la altura de la boca de entrada es de 14 centímetros, mientras que el ancho está sujeto a la medida de la parrilla (20 centímetros), por lo que el área de la sección transversal se calculó de la siguiente forma:  $A_c = 14 \text{ cm} * 20 \text{ cm} = 280 \text{ cm}^2$

Para maximizar la transferencia de calor, se redujo el espacio de circulación del gas caliente entre la boca de salida y las planchas. Para definir esta distancia de separación, es necesario como primera medida, determinar la circunferencia del área transversal aplicando la siguiente fórmula:  $C = 2\pi r$  en donde,  $C$  = Circunferencia del área transversal y  $r$  = radio ó distancia desde el centro del cuadrado hasta sus esquinas.

Una vez calculada esta variable, se determina el espacio de separación ( $S$ ), dividiendo el área de la sección transversal ( $A_c$ ) sobre el valor de la circunferencia ( $C$ ), por lo tanto se obtiene que:  $S = 280 \text{ cm}^2 / 76.69 \text{ cm} = 3.65 \text{ cm} \approx 4 \text{ cm}$

Considerando un espacio de separación entre las planchas y el nivel de la boca de salida de 4 centímetros, se procedió a determinar la distancia vertical entre la base de la cámara de combustión y la boca de salida. De acuerdo a los principios de diseño, esta distancia debería ser tres veces la altura de la boca de entrada ( $h$ ), es decir, para este caso puntual, dicha distancia debería ser de 42 cm ( $3h$ ), sin embargo, tuvo que ser reducida de acuerdo al siguiente análisis: la altura total de diseño de la estufa desde el nivel del suelo hasta las planchas es de 85 cm; la altura desde el nivel del suelo hasta el nivel de inferior de la cámara de combustión (parrilla) es de 44 cm; el espacio de separación entre las planchas y la superficie a nivel de la boca de salida es de 4 cm.

Considerando lo anterior, la distancia vertical de la cámara de combustión debió reducirse a 37 centímetros, es decir, 5 cm menos que la distancia recomendada. En la figura 2, se muestra la cámara de combustión implementada en las estufas mejoradas de la investigación.



**Figura 2.** Diseño de la cámara de combustión.

Una vez construida la cámara de combustión, se procedió a construir la totalidad del cuerpo de la estufa con el ladrillo normal (recocido). Un punto que se analizó minuciosamente fue el acoplamiento del horno dentro de la estructura de la estufa, dado que era necesario establecer como el flujo de gases podía cobijarlo de tal forma que pudiera calentarse de forma homogénea. Para dar solución a este inconveniente, se forzó el tiraje del gas caliente hacia la esquina frontal izquierda construyendo el orificio de salida de humo en dicho punto de la estufa con el propósito de que los gases pasen por la parte superior del horno y desciendan hacia la cavidad de evacuación de gases por el costado izquierdo del mismo. Finalmente el humo busca salida hacia el exterior de la cocina a través de la chimenea. Una vez construida la estufa (Figura 3), se efectuó la prueba de tiraje del humo, y se constató que los gases efectuaban el recorrido señalado en la figura 4.

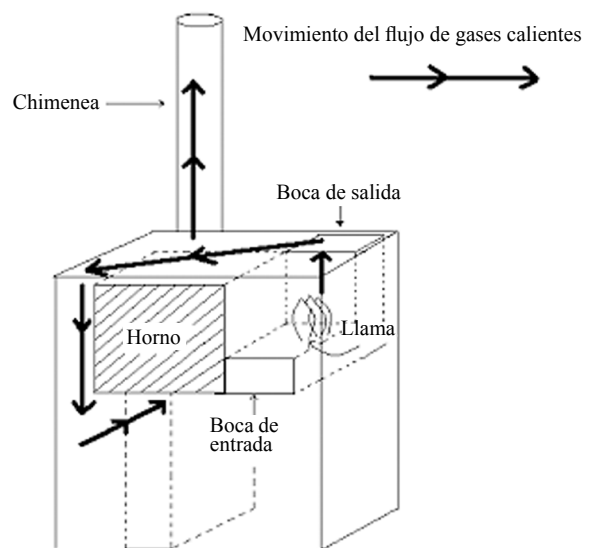
### **MONITOREO DE ESTUFAS Y CONSUMO DE LEÑA**

Para evaluar el rendimiento de los tres prototipos de estufa, fue necesario llevar a cabo una serie de pruebas que permitieran establecer el desempeño de las mismas en comparación con las estufas tradicionales utilizadas en la región (Figura 5).

Internacionalmente se utilizan dos tipos de pruebas para este propósito: la prueba de ebullición del agua (WBT) y la prueba de cocimiento controlado (CCT). Para efectos del proyecto, se escogió ésta última, puesto que permite analizar como se comporta un nuevo modelo de estufa con respecto de la estufa tradicional, a partir del cocimiento del mismo tipo de comida, ya que se ajusta a condiciones reales de campo. Esta prueba permite: comparar la cantidad de combustible (leña) usado por diferentes estufas para cocinar un tipo de comida; comparar el tiempo requerido para cocinar dicha comida e indagar si a las personas les gusta como la estufa cocina los alimentos.



**Figura 3.** Prototipo de la estufa mejorada.



**Figura 4.** Movimiento del flujo de gases al interior de la estufa mejorada.



**Figura 5a.** Estufa tradicional tipo "hornilla".

Para que los resultados sean validos, se debe garantizar la uniformidad de la prueba, lo cual implica utilizar el mismo tipo de alimentos en la misma proporción, usar la(s) misma(s) olla(s), el mismo tipo de madera y seguir el mismo procedimiento de preparación de la comida. La prueba establece que cada prototipo sea ensayado tres veces y de acuerdo a los resultados se debe determinar si es necesario efectuar pruebas adicionales.

Para cada prueba se utilizaron cinco kilos de leña seca al aire procedente del mismo árbol. El tipo de comida escogido para llevar a cabo el la prueba fue arroz con papas cocidas, el cual se cocina tradicionalmente en horas de la mañana, antecediendo el almuerzo y conocido en la región como "rumbiador".

**Tabla 1.** Ingredientes y cantidades utilizados en la prueba de cocimiento controlado

PLATO	INGREDIENTES	CANTIDAD (g)
Arroz	Arroz	500
	Mantequilla	12
	Aceite	20
	Cebolla	10
	Sal	4
	Agua	1350
Papas cocidas	Papas	1500
	Agua	1000



**Figura 5b.** Estufa tradicional tipo "caja".

Los ingredientes y las cantidades utilizadas para preparar esta comida se muestran en la tabla 1.

Se utilizaron dos ollas de aluminio con capacidades de dos y cuatro litros respectivamente. La primera con un peso de 284 g y fue utilizada en todas las pruebas para preparar el arroz, mientras que la segunda pesaba 313 g y en ella, se cocinaron las papas.

La prueba debe garantizar que la cocción de la comida sea realizada por las participantes de la misma forma, por lo que fue necesario estandarizar el procedimiento. La prueba inicia en el momento en que la ama de casa enciende la estufa y esta segura de que la llama no se extinguirá y finaliza una vez considere que tanto el arroz como las papas están completamente cocinadas.

Cuando concluían las pruebas, se registraban los respectivos tiempos de cocción se apagaba el fuego y se retiraban los tizones de la cámara de combustión, dejando que se enfriarán para su posterior pesaje, resultado que a la postre se sumaba al valor de la leña sobrante.

Este mismo procedimiento fue aplicado a una estufa tradicional que sirvió como referente para efectuar las comparaciones del caso. Los resultados obtenidos al efectuar las pruebas tanto en los tres prototipos como en la estufa testigo (tradicional) se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados del consumo específico de combustible por estufa

ESTUFA	CANTIDAD DE LEÑA SECA (g)	PESO TOTAL DE LA COMIDA (g)	CONSUMO ESPECIFICO DE LEÑA (g/Kg)
Tradicional	2.651	3.762	704
Mejorada 1	2.178	3.725	590
Mejorada 2	2.157	3.423	630
Mejorada 3	2.118	3.704	575

**Tabla 3.** Resultados del rendimiento de los prototipos con respecto a la estufa tradicional

ESTUFA	RENDIMIENTO EN COMPARACION CON LA ESTUFA TRADICIONAL
Mejorada 1	16%
Mejorada 2	10%
Mejorada 3	18%
<b>PROMEDIO</b>	<b>14,66%</b>

## RESULTADOS

### RENDIMIENTO DE LAS ESTUFAS MEJORADAS

Tomando como referente el consumo específico de combustible de la estufa tradicional, se llevaron a cabo las respectivas comparaciones con cada uno de los prototipos de estufas mejoradas, mediante el siguiente análisis:

$R_i = ((SC_k - SC_i) / SC_k) * 100$ , donde;

$R_i$ : rendimiento de la estufa mejorada  $i$  en comparación con la estufa tradicional (%)

$SC_k$ : consumo específico de combustible de la estufa tradicional (g/kg)

$SC_i$ : consumo específico de combustible de la estufa mejorada  $i$  (g/kg)

Con base en la anterior fórmula, los rendimientos obtenidos por cada uno de los prototipos ensayados con respecto a la estufa tradicional se presentan en la tabla 3.

El rendimiento promedio de los tres prototipos de estufas mejoradas en comparación con la estufa

tradicional que fue tomada como referente es de 14.66%. Lo anterior se traduce en un ahorro de 0.86 toneladas de leña al año por núcleo familiar, si se tiene en cuenta un consumo promedio anual de 6.2 ton/año.

### DISEÑO DE BANCOS DENDROENERGÉTICOS

Uno de los problemas fundamentales que enfrentan los pobladores de las áreas rurales del tercer mundo, es el acceso a fuentes energéticas modernas que les permita una completa sustitución de la leña como combustible doméstico. No obstante, las perspectivas de transición hacia insumos energéticos más eficientes y de mejor calidad, no parecen ser muy alentadoras en el mediano plazo, puesto que como lo considera FAO (2008), la biomasa tradicional seguirá siendo utilizada de forma prevaleciente en la calefacción y cocción de alimentos en las próximas dos décadas. Lo anterior, supone una aguda dependencia de los combustibles leñosos por parte de las comunidades rurales de muchos países en vías de desarrollo, lo que puede comprometer la seguridad energética de las mismas, en la medida que la base de los recursos forestales se agoten vertiginosamente. En este sentido, hay una imperiosa necesidad de asegurar el abastecimiento sostenido de leña

mediante la siembra de árboles orientados a propósitos energéticos a través de esquemas comunitarios ó domésticos, lo cual, de paso contribuye a reducir la presión existente sobre los bosques naturales adyacentes y sus consecuentes efectos sobre la biodiversidad, la regulación hídrica y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La producción de leña a escala doméstica debe considerar ciertos criterios de planificación que garanticen la autosuficiencia de los núcleos familiares en un lapso de tiempo determinado, los cuales, se dan en función de la demanda anual de leña. Para el caso particular, de la zona suroriental del municipio de Encino–Santander, un ahorro del 14% generado por la adopción de una estufa mejorada, reduce el consumo a 5.34 toneladas anuales por familia. Para determinar el marco temporal de productividad del banco dendroenergético, es esencial considerar el ritmo de crecimiento de la especie forestal utilizada, puesto que se debe predecir en que momento estará disponible la cantidad apropiada de leña para ser aprovechada por parte de la familia de tal manera que se garantice un aprovisionamiento sostenible en el tiempo. Dadas las características minifundistas que prevalecen en las áreas rurales más deprimidas del país, es poco realista considerar que la unidad familiar dedicará una buena parte del terreno de la finca a propósitos forestales, por lo que la decisión de cuanta superficie se deberá emplear en la siembra de árboles, dependerá en buena medida de la tasa de crecimiento de los árboles, la cual está en función de la especie y las características del sitio (Hamilton 2008). Las especies preseleccionadas deberían reunir los siguientes requisitos: alta rusticidad, fácil desarrollo y crecimiento ante limitantes y/o condiciones adversas, rápido crecimiento, tasas de desarrollo que permitan el aprovechamiento de los árboles en el menor tiempo posible, capacidad de fijar nitrógeno, mejoramiento de las condiciones del suelo en terrenos empobrecidos y con poco manejo agronómico, capacidad de rebrote, se garantiza la renovabilidad del recurso extendiendo el periodo de duración del banco dendroenergético y se reducen los gastos por resiembra de nuevos individuos.

### **Selección del sitio**

Un requisito básico que debe tenerse en cuenta en el momento de establecerse el banco de leña, es su cercanía con respecto a la vivienda del núcleo familiar. En la literatura especializada sobre el tema se citan varios ejemplos del tiempo que dedican los integrantes de una familia en tratar de recolectar la cantidad de leña necesaria para satisfacer sus necesidades de cocción de alimentos. Barnes *et al.* (1994), mencionan que las mujeres en las áreas rurales de Nepal gastaban casi dos horas y media al día, recolectando leña; situación que se agravaba en aquellas áreas fuertemente deforestadas en donde el tiempo dedicado a esta actividad incluso podía aumentar en una hora adicional. Aloo (1993), señala que un estudio llevado a cabo en Kenya a finales de los ochentas, demostraba que las mujeres gastaban 3.9 horas y los hombres 0.7 horas dedicadas por semana a recolectar leña. Juárez (2005), indicaba que una familia promedio de una comunidad rural en Guatemala empleaba casi 100 jornales al año recolectando y transportando leña hasta su vivienda. En el caso particular del área de estudio, Ocaña (2005), encontró que el tiempo dedicado a esta labor oscilaba entre una y dos horas diarias dependiendo de la distancia a la fuente de recolección.

Por lo anterior, se justifica que el banco dendroenergético sea establecido lo más cerca posible a la vivienda del núcleo familiar, utilizando aquellas áreas marginales de la finca que no se dediquen a actividades productivas, de lo contrario, es recomendable la incorporación del banco de leña en arreglos agroforestales que puedan conciliar el uso agrícola ó pecuario con el componente silvícola.

### **Distribución y densidad de siembra**

La distribución del banco de leña se encuentra supeeditada a la disponibilidad de una superficie adecuada para este propósito. Dependiendo de la especie forestal a utilizar, el área requerida para la siembra de árboles puede fluctuar de menos de 0.1 hectáreas a más de 3 hectáreas, lo cual hace que la disponibilidad de tierra se convierta en un condicionante de la especie elegida. Los patrones de distribución y tenencia de la tierra en el área de estudio, oscilan



entre menos de una hectárea a cinco hectáreas por unidad productiva familiar (Solano *et al.* 2006), lo cual hace virtualmente imposible pensar en bancos de leña superiores a una hectárea por finca. En virtud de lo anterior, se contemplan dos opciones de distribución del banco dendroenergético el cual, puede ser plantado de forma agrupada (bosquete) ó bien dispuesto de forma lineal en diferentes sectores de la finca.

### ***Bosquete***

La plantación de árboles agrupados en un solo punto es recomendado para aquellas fincas con extensiones superiores a dos hectáreas, siempre y cuando, la superficie a utilizar para este propósito no exceda las 0.1 hectáreas. Se pueden utilizar aquellos sitios no utilizados para labores agropecuarias tales como zonas con pendientes pronunciadas, áreas rocosas ó sitios poco productivos por deficiencia de nutrientes. Se debe considerar una densidad de siembra de 1 árbol por cada 4 m<sup>2</sup> dispuestos a “tres bolillo”.

### ***Siembra lineal***

Este sistema es apropiado para fincas con poco espacio disponible para sembrar árboles y en los que necesariamente deben ser integrados en arreglos agroforestales. Los individuos pueden ser plantados como cercas vivas, barreras cortaviento ó callejones entre cultivos. La producción de leña en sistemas agroforestales ha probado ser exitosa en América Central en donde el tamaño de las unidades productivas es menor a una hectárea en promedio. Se sugiere un distanciamiento de 2 metros entre individuos y la finca debería contar con al menos 400 metros lineales disponible para el establecimiento de los árboles.

### ***Manejo silvicultural***

En esencia un banco dendroenergético es una plantación forestal a pequeña escala que difiere enormemente en cuanto al manejo silvicultural que se le debe dar. Las plantaciones forestales orientadas a la producción de leña no requieren muchos cuidados, dado que su propósito es producir un bien cuyas características físicas y morfológicas no afectan sus propiedades térmicas. Por tal razón, y contrario a lo que sucede con los árboles

orientados a producción de madera comercial, no es importante si la plantación genera árboles con fustes torcidos u otro tipo de defectos. No obstante, se debe considerar que el sitio escogido para el establecimiento de la plantación reúna los requisitos mínimos exigidos por la especie en cuanto disponibilidad de agua y nutrientes, así como protección de agentes externos que puedan afectarla (daños por ramoneo del ganado o ataque de plagas).

Dado que los suelos en los cuales se establece la plantación pueden ser deficitarios en nutrientes, es preferible que la especie tenga la capacidad de fijar nitrógeno con el objeto de mejorar la calidad del terreno. Aplicar la ceniza procedente de la incineración de la leña es una buena práctica que mejora la fertilidad del suelo, dado que esta sustancia contiene carbonato de potasio (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y que puede contribuir al mejor desarrollo de los árboles sin incurrir en gastos de abono. De otro lado, los árboles sembrados en arreglos agroforestales pueden beneficiarse de los fertilizantes aplicados a los cultivos agrícolas.

No se requiere efectuar podas, salvo si el propósito de la misma es proveer de leña a la familia antes del primer aclareo. Puesto que el objetivo del banco es abastecer de leña a la familia en el menor tiempo posible, debe considerarse una rotación corta para este tipo de plantaciones, la cual estará determinada por la tasa de crecimiento de la especie utilizada y la superficie dedicada para esta actividad. Considerando que las especies forestales catalogadas como de rápido crecimiento no producen la suficiente cantidad de biomasa leñosa en un periodo menor a seis años bajo densidades de siembra de 2500 individuos por hectárea, se establece éste como el mínimo plazo para efectuar la primera entresaca. Esto significa que solo a partir del sexto año en adelante podrán aprovecharse los árboles para obtener leña, momento en el cual se debe tomar la decisión de efectuar el correspondiente replante para sustituir los árboles apeados o permitir el rebrote de los tocones. Se fija como turno final el décimo año.

La cantidad de árboles requeridos para hacer sostenible el autoabastecimiento de leña en cada finca para el año (i), se da como resultado de dividir la



**Tabla 4.** Cantidad de árboles requeridos para conformar el banco de leña según la especie.

ESPECIE	IMA ALTURA (m)	IMA DAP (cm)	CANTIDAD DE ARBOLES REQUERIDOS
Aliso	1,5	2	555
Acacia japonesa	1,5	2	227
Eucalipto	2	2	155
Roble	0,5	0,58	6.757

demanda anual por núcleo familiar sobre la producción de biomasa leñosa fustal estimada para un individuo de la especie forestal  $\phi$  en el año (i), por lo tanto, el total de árboles que deben ser sembrados responden a la siguiente formula:

$$\text{No. árboles} = \sum_{i=6}^{10} (D_{fw} / B_{\phi i}) , \text{ en donde;}$$

$D_{fw}$ : Demanda anual de leña del núcleo familiar en toneladas

$B_{\phi i}$ : Producción de biomasa leñosa fustal estimado para un individuo de la especie  $\phi$  en el año (i) en toneladas

En virtud de lo anterior, se evaluaron cuatro especies forestales con reconocidas características dendroenergéticas, las cuales son aptas para plantar en el área de estudio y entre las cuales se incluye el roble (*Quercus humboldtii*). Salvo en el caso del aliso (*A. acuminata*), para las demás especies (*E. globulus*, *A. melanoxylon* y *Q. humboldtii*) se aplicó la ecuación de volumen standard individual teniendo en cuenta el incremento medio anual (IMA) en altura y en diámetro, el cual fue proyectado para cada año. Para el aliso se aplicó la ecuación de volumen desarrollada por CENICAFE (Ospina *et al.* 2005) Con base en los resultados calculados, se obtuvieron los resultados observados en la tabla 4, de los cuales se puede inferir que las especies de rápido crecimiento son más apropiadas para el establecimiento de bancos de leña puesto que demandan una menor cantidad de árboles, y consecuentemente, una menor extensión de terreno para la plantación.

### **Reducción de emisiones de dióxido de carbono**

Una de las contribuciones más relevantes de la implementación de estufas eficientes esta relacionado con el potencial de reducir la degradación de los bosques existentes asociado a prácticas extractivas insostenibles y su impacto sobre el cambio climático global. De acuerdo al IPCC (2007), el 17% de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> se deben a la deforestación y aunque de acuerdo a FAO (2008), el consumo de combustibles leñosos ha fluctuado entre 1800 y 1900 millones de metros cúbicos en la última década, no se tiene certeza de que porcentaje de las emisiones de dióxido de carbono corresponde a la utilización de leña para propósitos domésticos.

Como en cualquier combustible, son el carbono y el hidrogeno los que le confieren las propiedades térmicas a la madera que al incinerarse eficientemente generan dióxido de carbono y vapor de agua como productos residuales del proceso. Sin embargo, cuando se produce una combustión ineficiente, se producen gases no deseados como el metano (CH<sub>4</sub>), el monóxido de carbono (CO) y oxido nitroso (N<sub>2</sub>O), los cuales presentan un potencial de efecto invernadero mucho mayor que el CO<sub>2</sub>.

La reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> asociada a la implementación de una estufa mejorada, está determinada por su capacidad de disminuir el consumo de leña procedente de una fuente cuya capacidad de autoregeneración podría estar por debajo de la tasa de extracción, lo cual establece si dicha actividad se realiza sobre una base sostenible ó no.

Lo anterior estipula que tan renovable es la leña que se recolecta en un área geográfica en particular. En una situación de sostenibilidad del recurso, la cantidad de leña consumida en determinado lugar debería ser menor o igual a la cantidad de biomasa leñosa que se produce en dicho sitio; mientras que la condición de insostenibilidad se presenta cuando la extracción de leña esta por encima de la capacidad de autoregeneración de dicho recurso. Esto se conoce como el estatus de renovabilidad de la biomasa. Cuando la renovabilidad es positiva, las emisiones de dióxido de carbono que producen las estufas se consideran neutrales puesto que ni añaden ni sustraen carbono del ciclo natural de este elemento, dado que la misma cantidad de carbono liberado en la combustión, será recapturado por la vegetación en crecimiento (RWEDP/UNEP 2000).

De otro lado, si se cosechan mas árboles de los que se desarrollan en determinado sitio, el  $\text{CO}_2$  liberado por la combustión de la leña no podrá ser recapturado por la vegetación, convirtiéndose en un gas de efecto invernadero, por lo que se considera que la renovabilidad es negativa. Esto necesariamente implica que solo una fracción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  producidas por la combustión de la leña serían consideradas como gases de efecto invernadero. Bajo este enfoque, la estimación de cantidad de  $\text{CO}_2$  que dejaría de emitirse resultaría bastante compleja puesto que habría que delimitar el área geográfica de la fuente de leña para establecer la cantidad de biomasa existente y su tasa de producción sobre una base anual. La remoción de biomasa leñosa para propósitos energéticos estaría supeditada al número de hogares que cocinan con leña dentro de esa área particular con el objeto de calcular la demanda anual. Dada las limitantes técnicas del proyecto, no fue posible establecer cuál es el potencial de emisiones de dióxido de carbono que podrían evitarse aplicando el enfoque de la “renovabilidad de la biomasa”.

No obstante, se empleó un enfoque más pragmático para determinar las emisiones de  $\text{CO}_2$  que podrían evitarse al utilizar las estufas mejoradas evaluadas por el proyecto. Independientemente del criterio de sostenibilidad o insostenibilidad del cual se hacia

referencia anteriormente, el hecho de disminuir el consumo de leña en un porcentaje determinado, implica que se está ahorrando cierta cantidad de madera ó bien procedente de árboles en pie ó de necromasa leñosa. Considerando lo anterior, el punto neurálgico de la discusión es como esa cantidad de madera se traduce en degradación forestal evitada (si la fuente fuera un bosque natural). Tomando en cuenta la densidad de biomasa de un bosque que de acuerdo a Brown (1997), es definida como “la cantidad total de materia orgánica viva por encima del suelo presente en los árboles y expresada en toneladas secas por unidad de superficie”, es posible hacer una estimación sobre la proporción de biomasa que correspondería a la cantidad de leña que consume una familia en el área de estudio sobre una base anual.

Partiendo de la base, que un ahorro del 14% representa 0.86 toneladas anuales de leña con un contenido de humedad promedio del 25%; el valor ajustado es de aproximadamente 0.64 toneladas anuales de biomasa leñosa anhidra. Este valor representa aproximadamente el 0.32% de la biomasa total de una hectárea de bosque de roble.

Para determinar la cantidad de dióxido de carbono liberado por extracción de leña, se aplica la ecuación 3.2.8 del manual de orientación del IPCC sobre buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (2003):

$P_{\text{leña}} = \text{LR} * \text{D} * \text{FEB} * \text{FC}$ , en donde;  
 $P_{\text{leña}}$ : perdida anual de carbono debido a la recolección de leña, en toneladas de C por año.

LR: volumen anual de leña recolectada en  $\text{m}^3$  por año.

D: densidad básica de la madera en toneladas por metro cúbico.

FEB: factor de expansión de biomasa para convertir volumen en biomasa aérea total sobre el suelo.

FC: fracción de carbono de la materia seca (valor por defecto 0.5)

Dado que fue posible determinar la cantidad de leña de forma directa, se asume que 0.64 toneladas es el producto del volumen de leña recolectado (LR) por la densidad básica (D). Brown (1997), sugiere utilizar un FEB por defecto de 1.74 para latifoliadas de bosques tropicales, en consecuencia la pérdida anual de carbono por recolección de leña es calculada de la siguiente manera:

$$P_{\text{leña}} = 0.64 * 1.74 * 0.5 = 0.55 \text{ ton carbono.}$$

Considerando que el carbono es liberado en forma de CO<sub>2</sub>, se estima que se dejarían de emitir 1.85 toneladas equivalentes al año por familia al evitar la eliminación de esta cantidad de biomasa.

Los bancos dendroenergéticos cumplen la función de un sumidero temporal de carbono, puesto que en su proceso de desarrollo, capturan el CO<sub>2</sub> para transformarlo en celulosa (madera). Sin embargo, el objetivo del mismo es desplazar el consumo de leña proveniente de bosque natural, por lo tanto, si se considera que anualmente se sustituyen 4.6 toneladas de leña, la pérdida de carbono asociada por este concepto se estima de la siguiente forma:

$$P_{\text{leña}} = 4.6 * 1.74 * 0.5 = 4 \text{ ton carbono.}$$

Las emisiones de dióxido de carbono anuales que se dejarían de emitir al sustituir leña procedente de bosques naturales por bancos dendroenergéticos serían de aproximadamente 13.34 toneladas anuales por núcleo familiar.

## CONCLUSIONES

Los tres prototipos de estufas mejoradas arrojaron un rendimiento del 14% con respecto a la estufa tradicional. Esto significa un ahorro de 0.86 toneladas de leña al año por familia. Sin embargo, se estima que los ahorros pueden ser mayores debido a que el resultado arrojado por la Prueba de Cocimiento Controlado (CCT) no contempla las condiciones que se presentan durante una jornada normal de cocina.

Para reducir completamente la dependencia de leña procedente de los bosques de roble, se diseñaron bancos dendroenergéticos evaluando las especies

aliso (*Alnus acuminata*), acacia japonesa (*Acacia melanoxydon*), eucalipto común (*Eucalyptus globulus*) y roble (*Quercus humboldtii*). La extensión del banco de leña puede variar en función del tipo de especie utilizada y la disponibilidad de terreno al interior de la unidad de producción familiar, encontrándose que especies como el eucalipto ó la acacia japonesa requieren una superficie inferior a 1000 m<sup>2</sup> hasta más de 2 hectáreas para el caso del roble. Teniendo en cuenta que las unidades de producción familiar en el área de estudio fluctúan entre menos de una hectárea a más de cinco hectáreas, solo se considera factible el establecimiento de los bancos dendroenergéticos con especies de rápido crecimiento que requieran la mínima cantidad de terreno posible.

Los beneficios ambientales de un proyecto que integre tanto estufas mejoradas como bancos de leña se observan desde la perspectiva de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a procesos de degradación forestal, en donde ciertos depósitos de carbono son fuertemente impactados por prácticas extractivas cuya intensidad puede variar de acuerdo a las circunstancias. La utilización de una estufa mejorada evita el consumo de 0.86 toneladas anuales, representando aproximadamente el 0.32% de la cantidad de biomasa calculada en una hectárea de bosque de roble.

La reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> sería de 1.85 toneladas equivalentes por estufa mejorada. La sustitución completa de leña procedente del roble por bancos dendroenergéticos tiene el potencial evitar emisiones del orden de 13.34 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Un proyecto que integre tanto estufas mejoradas como bancos de leña podría evitar la liberación de 15.2 toneladas de dióxido de carbono anuales por familia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Aloo, T.** 1993. Fuelwood and tree planting: a case study from Funyula division in western Kenya. Tesis de doctorado. University of British Columbia. Faculty of Graduate Studies. Department of Forest Resources Management. Victoria. 202 p.

- Aprovecho Research Center.** 2005. Design principles for wood burning cookstoves. Aprovecho Research Center – Shell Foundation. Eugene. 40 p.
- Barnes, D., K. Openshaw, K. Smith, & R. Van der Plas** 1994. What makes people cook with improved biomass stoves?. The World Bank. Washington D.C. 45 p.
- Brown, S.** 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. FAO. Roma. 55 p.
- Food and Agriculture Organization.** 2008. Bosques y energía: cuestiones clave. FAO, Roma. Italia. 69 p.
- Hamilton, L.** 2008. Growing plantation firewood. AgricultureNotes.AG1106. Disponible en: <http://new.dpi.vic.gov.au/notes/foestry/farm-forestry/ag1106-growing-plantation-firewood>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2003. Orientación del IPCC sobre buenas prácticas para UTCUTS. IPCC. Geneve. 628 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2007. Climate change 2007: Synthesis report IPCC. Geneve. 22 p.
- International Energy Agency.** 2006. World energy outlook. 2006: IEA. Paris. 596 p.
- Juarez, F.** 2002(?). Estufas ahorradoras de leña tipo plancha. PRODERQUI. Ciudad de Guatemala. Disponible en: [http://www.rimisp.org/fida\\_old/getdoc.php?docid=1324](http://www.rimisp.org/fida_old/getdoc.php?docid=1324).
- Ocaña, R. E.** 2005. Especies vegetales dendroenergéticas utilizadas por los pobladores del Encino–Santander. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Biología. Bogotá. 50 p.
- Ospina, C., Aristizabal, F., J. Godoy, D. Gómez, R. Hernández, J. Medina & J. Patiño.** 2005. Guías silviculturales para el manejo de especies forestales con miras a la producción de madera en la zona andina Colombiana: El aliso ó cerezo. CENICAFE – Federación Nacional de Cafeteros. Manizales. 37 p.
- RWEDP/UNEP.** 2000. Reducing greenhouse gas emissions by promoting biomass energy technology in South Asia. Informe presentado al GEF. Bangkok.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia.** 2006. Estadísticas de producción y comercio años 2000-2005. Boletín de estadísticas nacionales. Disponible en: <http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=138&conID=100>
- Solano, C., C. Roa, & Z. Calle.** 2006. Estrategia de desarrollo sostenible: Corredor de conservación Guantiva–La Rusia–Iguaque. Fundación Natura. Bogotá. 92 p.
- World Health Organization.** 2006. Fuel for life. Household Energy and Health. WHO Press. Geneve. 42 p.